

บทที่ 2

หลักการและทฤษฎี

หลักการของการอัดรีดจะอยู่บนพื้นฐานของการเคลื่อนที่ของมวล โมเมนตัม และพลังงาน และใช้สมการอนุรักษ์มวล อนุรักษ์โมเมนตัม และใช้หลักการอนุรักษ์พลังงานในการอธิบายปรากฏการณ์การเปลี่ยนแปลงของพลาสติกจากของเหลวไปเป็นของแข็ง โดยกำหนดให้พลาสติกเป็นสสารชนิดคอนตินิวอัม (Continuum)

2.1 สมการสมดุลโมเมนตัม

โมเมนตัมคือปริมาณเวกเตอร์ที่เกิดจากผลคูณของมวล และความเร็ว และเนื่องจากโมเมนตัมเป็นค่าที่เกิดขึ้นอันเป็นผลมาจากการเคลื่อนที่ ดังนั้นสมการสมดุลโมเมนตัมก็คือสมการสมดุลการเคลื่อนที่ด้วยเช่นกัน

สำหรับการไหลของพลาสติกเหล่านั้นความเฉื่อย และแรงจากวัตถุสามารถตัดทิ้งได้ และสมการสมดุลโมเมนตัมในระบบพิกัด $x y z$ สามารถเขียนได้ดังสมการที่ (2.1) ถึง (2.3)

$$\frac{\partial p}{\partial x} = \frac{\partial \tau_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yx}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zx}}{\partial z} \quad (2.1)$$

$$\frac{\partial p}{\partial y} = \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yy}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zy}}{\partial z} \quad (2.2)$$

$$\frac{\partial p}{\partial z} = \frac{\partial \tau_{xz}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yz}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zz}}{\partial z} \quad (2.3)$$

โดยที่ P คือความดัน และ τ คือความเค้นเฉือน

หรือเขียนสมการที่ (2.1) ถึง (2.3) ในรูปแบบของความเร็วในแนวแกน $x y$ และ z ได้ตามลำดับดังสมการที่ (2.4) ถึง (2.6)

$$\frac{\partial p}{\partial x} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\eta \frac{\partial v_x}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\eta \frac{\partial v_x}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\eta \frac{\partial v_x}{\partial z} \right) \quad (2.4)$$

$$\frac{\partial p}{\partial y} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\eta \frac{\partial v_y}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\eta \frac{\partial v_y}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\eta \frac{\partial v_y}{\partial z} \right) \quad (2.5)$$

$$\frac{\partial p}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\eta \frac{\partial v_z}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\eta \frac{\partial v_z}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\eta \frac{\partial v_z}{\partial z} \right) \quad (2.6)$$

โดยที่ v คือความเร็ว และ η คือความหนืด

2.2 ความหนืดและสมบัติของของไหล

เมื่อของไหลเกิดการไหล ความเร็วของการไหลและอัตราการไหล จะถูกควบคุมโดยความต้านทานภายในของของไหลนั้น ค่าความต้านทานภายในของของไหลคือความหนืด ซึ่งสามารถหาได้จากการใช้เครื่องมือ คาปิลลารี รีโอมิเตอร์ นอกจากนี้คาปิลลารี รีโอมิเตอร์ยังสามารถใช้ในการวัดค่าความเค้น และความเครียดเป็นต้น ค่าความหนืดของวัสดุชนิดต่างๆมีค่าแตกต่างกัน ดังแสดงในตาราง 2.1

ตาราง 2.1 ความหนืดของวัสดุชนิดต่างๆ (เจริญ, 2542)

ชนิดวัสดุ	ความหนืด (Pa.s)	ลักษณะเนื้อสาร
อากาศ	10^{-5}	ก๊าซ
น้ำ	10^{-3}	ของเหลว
ลาเทกซ์โพลีเมอร์	$10^{-3} - 10^{-2}$	ของเหลว
สี	$10^{-2} - 10^{-1}$	ครีม
น้ำมันมะกอก	10^{-1}	ของเหลว
กลีเซอรอล	10	ของเหลวหนืด
อีพอกซีเรซิน	50	หนืดคล้ายน้ำเชื่อม
โพลียูรีเทนเหลว	$10^2 - 10^3$	หนืดคล้ายน้ำเชื่อม
พลาสติกเหลว	$10^2 - 10^6$	เหนียวหนืด

พลาสติกเหลวเป็นของไหลที่มีพฤติกรรมการไหลที่ซับซ้อน คือค่าความหนืดจะเปลี่ยนแปลงไปตามปัจจัยต่างๆ เช่นอัตราการเฉือน เวลาที่ใช้ในการไหล อุณหภูมิ ความดัน และแรงที่กระทำจากภายนอก ขณะพลาสติกเหลวเกิดการไหลได้ทั้งการไหลแบบเนียน และการไหลแบบขี้ด คือมีการไหลหนืดที่ตอบสนองต่อความเค้นเฉือน และการไหลแบบขี้ดซึ่งสนองต่อความเค้นขี้ด (Tensile stress หรือ Elongation stress หรือ Extensional stress)

การไหล และการเปลี่ยนแปลงรูปร่างของพลาสติกเหลวจากความเค้นเฉือนในช่วงที่พลาสติกเหลวมีความเค้นเฉือนมากเท่านั้น โมเลกุลของพลาสติกเหลวจะเกิดการจัดเรียงตัวใหม่ เพื่อให้เคลื่อนตัวผ่านโมเลกุลอื่นๆ ได้ง่ายขึ้น ส่งผลให้ความหนืดลดลง ตามอัตราการเฉือนที่เพิ่มขึ้น ข้อดีของการลดลงของความหนืดในพลาสติกเหลวมีหลายประการคือ

1. ทำให้ลดพลังงานที่ใช้ในการแปรรูป
2. สามารถขึ้นรูปชิ้นงานที่มีขนาดใหญ่ได้ง่ายขึ้น
3. เครื่องจักรใช้ในการผลิตมีขนาดลดลง
4. เพิ่มปริมาณการผลิตได้มากขึ้น
5. สามารถใช้ความดันต่ำในการผลิต
6. สามารถใช้ผลิตชิ้นงานที่มีความซับซ้อนได้ เนื่องจากมีการไหลที่ดีกว่า

2.2.1 พฤติกรรมการไหลของพลาสติกเหลว

พลาสติกเหลวนั้นจัดเป็นของไหลประเภทนอนนิวโตเนียน คือเป็นของเหลวที่ไม่ขึ้นกับกฎความหนืดของนิวตัน (Newton's law of viscosity) โดยของเหลวประเภทนอนนิวโตเนียนจะมีความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นเฉือน τ กับอัตราการเฉือน $\dot{\gamma}$ ไม่เป็นเส้นตรงเหมือนกับของเหลวนิวโตเนียนและความหนืดของของไหลนอนนิวโตเนียนจะเปลี่ยนแปลงตามอัตราการเฉือน

รูป 2.1 แสดงความแตกต่างระหว่างของเหลวนิวโตเนียนและของเหลวนอนนิวโตเนียน ที่มีต่ออัตราอัตราการเฉือน (Shear rate) ที่เพิ่มขึ้น ในรูป 2.1(ก) แสดงการเปลี่ยนแปลงของความเค้นเฉือนเมื่อเพิ่มอัตราการเฉือนให้กับของเหลวทั้งสองชนิด

โดยที่อัตราการเฉือนที่มีผลต่อพฤติกรรมของของเหลวนิวโตเนียนสามารถอธิบายตามกฎความหนืดของนิวตัน (Newton's law of viscosity) ดังสมการที่ (2.7)

$$\tau = \mu \dot{\gamma} \quad (2.7)$$

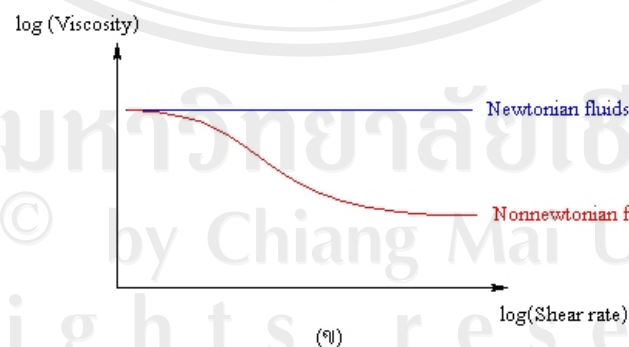
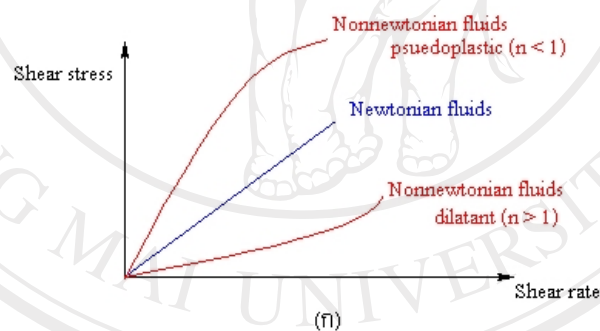
ส่วนอัตราการเฉือนที่มีผลต่อพฤติกรรมของของไหลอนิวโตเนียนอธิบายตามรูปแบบของสมการยกกำลัง (Power law model) ดังสมการที่ (2.8)

$$\tau = m\dot{\gamma}^n \quad (2.8)$$

โดยที่ n คือค่าคงที่ในสมการยกกำลัง ที่นิยมใช้ในการอธิบายพฤติกรรมการไหลของไหลอนิวโตเนียน โดยเมื่อ $n < 1$ จะเรียกว่า ของไหลซูโดพลาสติก (Pseudoplastics) และเมื่อ $n > 1$ จะเรียกว่าของไหลไดลาแทน (Dilatant) ส่วนของไหลนิวโตเนียนจะมีค่า $n = 1$

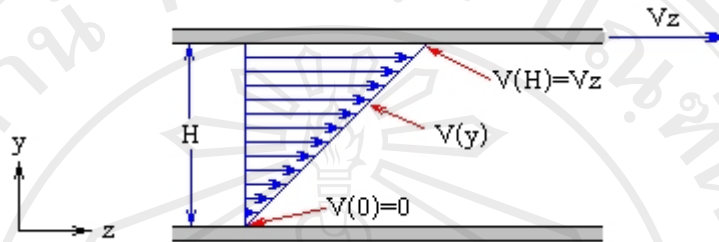
ส่วน m คือค่าคงที่ของสมการยกกำลังที่ใช้อธิบายพฤติกรรมของไหลอนิวโตเนียน ซึ่งจะขึ้นกับชนิดของสาร และอุณหภูมิ

ในรูป 2.1(ข) แกน y คือค่าล็อกของความหนืดของของเหลว ซึ่งของไหลอนิวโตเนียนชนิดซูโดพลาสติกจะมีความหนืดลดลงตามค่าล็อกของอัตราการเฉือนที่เพิ่มขึ้น ส่วนของไหลนิวโตเนียนจะมีความหนืดที่คงที่ไม่ขึ้นกับอัตราการเฉือน



รูป 2.1 ความแตกต่างระหว่างของไหลนิวโตเนียน และของไหลอนิวโตเนียน (เจริญ, 2542)

การเปลี่ยนแปลงรูปร่างของพลาสติกเหลวสามารถอธิบายได้ดังรูป 2.2 ซึ่งกำหนดให้พลาสติกเหลวอยู่ระหว่างแผ่นแบนขนานกันสองแผ่น ซึ่งมีระยะห่างกันเท่ากับ H โดยที่แผ่นหนึ่งเคลื่อนที่ และอีกแผ่นหนึ่งอยู่กับที่ แผ่นที่เคลื่อนที่ที่กำหนดให้มีความเร็วเท่ากับ V_z แผ่นขนานที่อยู่กับที่มีความเร็วเท่ากับศูนย์ รูปแบบของการไหลของพลาสติกเหลวคือ $V(y)$



รูป 2.2 ลักษณะการไหล และการเปลี่ยนแปลงรูปร่างของพลาสติกเหลวจากความเค้นเฉือน

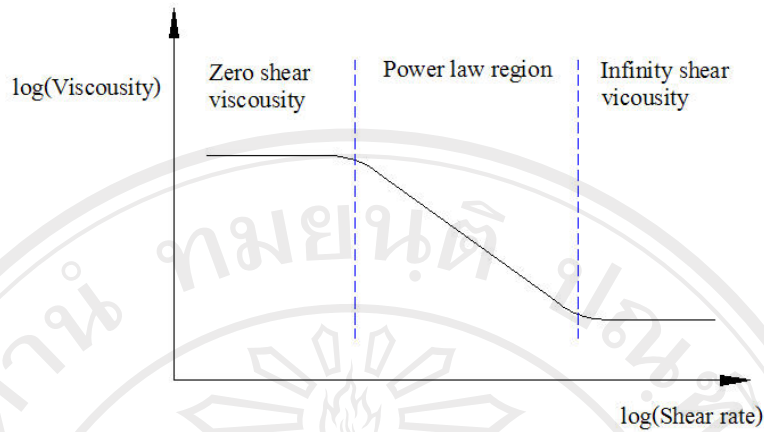
เมื่อกำหนดให้ τ_{yz} คือความเค้นเฉือนในทิศทางกรไหลตามแนวแกน z อธิบายตามสมการที่ (2.9)

$$\tau_{yz} = \eta \frac{dV_z}{dy} \quad (2.9)$$

โดยที่ η คือความหนืด อธิบายตามสมการที่ (2.10)

$$\eta = m \left(\frac{dV_z}{dy} \right)^{n-1} \quad (2.10)$$

ค่า m และ n นั้นสามารถหาได้จากการทดลองโดยใช้เครื่องคาปิลลารี รีโอมิเตอร์ (Capillary rheometer) เพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการเฉือน และความหนืด ซึ่งความสัมพันธ์ระหว่างค่า ล็อกของอัตราการเฉือน และ ค่าล็อกของความหนืดจะมีแนวโน้มเป็นเส้นตรงในช่วงช่วงหนึ่ง (Power law region) ตามกฎของสมการยกกำลัง เมื่อนำค่าดังกล่าวมาสร้างกราฟในรูปแบบแกนล็อก-ล็อก จะได้ดังรูป 2.3



รูป 2.3 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการเฉือน และความหนืด ในรูปแบบแกนล็อก-ล็อก ของของไหลนอนนิวโตเนียน

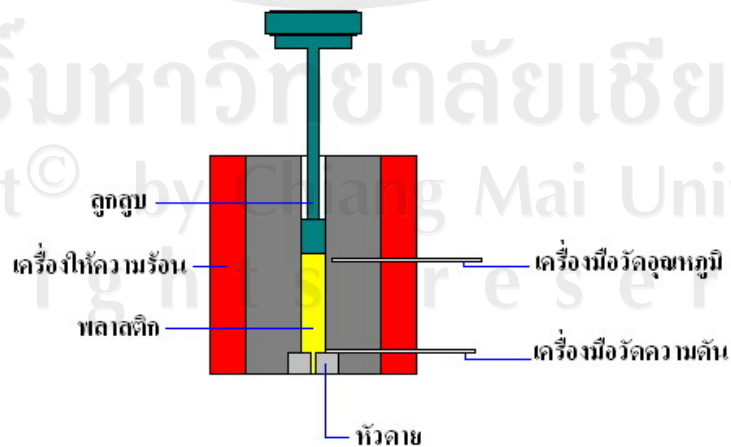
และค่า m มีความสัมพันธ์กับอุณหภูมิตามสมการที่ (2.11) (Zehev, 1979)

$$m = m_0 e^{-a(T-T_0)} \tag{2.11}$$

โดยที่ m_0 , a และ T_0 คือค่าคงที่ ส่วน T คืออุณหภูมิของพลาสติกเหลว

2.2.2 คาปิลลารี รีโอมิเตอร์ (Capillary rheometer)

คาปิลลารี รีโอมิเตอร์ คือเครื่องอัดรีดแบบกระทุ้งที่มีหัวคายแบบคาปิลลารีติดตั้งอยู่ บริเวณทางออก ดังรูป 2.4



รูป 2.4 แสดงหลักการทำงานของเครื่องคาปิลลารี รีโอมิเตอร์

การทำงานเริ่มต้นด้วยการป้อนเม็ดพลาสติกที่ต้องการทดสอบลงในเครื่องคาปิลลารี รีโอมิเตอร์ให้ถึงระดับที่เครื่องต้องการจากนั้นเม็ดพลาสติกจะถูกทำให้ร้อนโดยเครื่องให้ความร้อนที่ติดตั้งไว้บริเวณผนังจนพลาสติกที่บรรจุไว้อ่อนตัวจนสามารถไหลได้ ในระหว่างที่เกิดการหลอมนี้ จะมีการกระทุ้งเม็ดพลาสติกลงไปอีกเพื่อไล่อากาศที่อยู่ในกระบอกสูบออก หลังจากนั้นจะใช้ลูกสูบที่สามารถเชื่อมต่อกับระบบอัดโน้มิตแทน ซึ่งระบบอัดโน้มิตนี้ทำงานด้วยตัวเองเมื่ออุณหภูมิของพลาสติกคงที่อยู่ ณ ตำแหน่งที่ได้กำหนดไว้ เมื่อลูกสูบเคลื่อนที่ลงมาเพื่อออกแรงให้พลาสติกไหลลงมาจากหัวตาย จะทำให้เกิดความดันตกคร่อมระหว่างหัวตายคาปิลลารี แรงของลูกสูบที่กระทำ ปริมาณพลาสติกเหลวที่ไหลออกมา และความดันตกคร่อมหัวตายจะถูกบันทึกไว้ โดยค่าที่ได้สามารถนำไปคำนวณค่าต่างๆได้ตามสมการที่ (2.12) ถึง (2.14) (Cogwell, 1981)

$$\text{ค่าความเค้นเฉือน} \quad \tau = \frac{R\Delta P}{2L} \quad (2.12)$$

$$\text{อัตราการเฉือน} \quad \dot{\gamma} = \frac{4Q}{\pi R^3} \quad (2.13)$$

$$\text{ความหนืด} \quad \eta = \frac{\tau}{\dot{\gamma}} \quad (2.14)$$

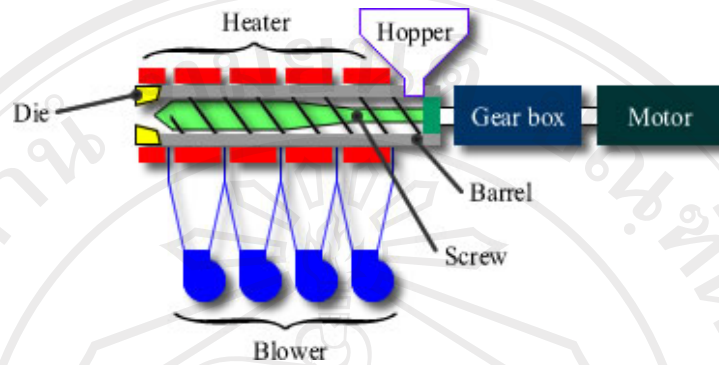
โดยที่ τ คือค่าความเค้นเฉือน $\dot{\gamma}$ คืออัตราการเฉือน η คือความหนืด ΔP คือค่าความดันตกคร่อมหัวตาย R คือรัศมีของคาปิลลารี L คือความยาวของหัวตาย Q คือค่าอัตราการไหลโดยปริมาตร

ซึ่งความสัมพันธ์ระหว่างค่าลือกของอัตราการเฉือน และค่าลือกความหนืดที่ได้จะสามารถนำไปหาค่าคงที่ m และ n ของสมการยกกำลัง โดยที่ค่าคงที่นี้จะขึ้นกับชนิด และคุณภาพของพลาสติกที่นำมาวัดค่า

2.3 หลักการทำงานของเครื่องอัดรีดพลาสติกชนิดสกรูเดี่ยว

เครื่องอัดรีดพลาสติกชนิดสกรูเดี่ยวเป็นอุปกรณ์ที่สำคัญชนิดหนึ่งในกระบวนการหลอมพลาสติก โดยทั่วไปเครื่องอัดรีดพลาสติกชนิดสกรูเดี่ยวจะมี ส่วนประกอบที่สำคัญคือ

มอเตอร์ (Motor) เฟืองทด (Gear box) กรวยป้อน (Hopper) กระบอก (Barrel) สกรู (Screw) เครื่องให้ความร้อน (Heater) และหัวตาย (Die) และ พัดลม (Blower) ตามรูป 2.5



รูป 2.5 แสดงส่วนประกอบที่สำคัญของเครื่องอัดรีดพลาสติกชนิดสกรูเดี่ยว

การทำงานของเครื่องอัดรีดพลาสติกชนิดสกรูเดี่ยว เริ่มต้นด้วยการป้อนพลาสติกเม็ดหรือพลาสติกผงเข้าทางกรวยป้อน จากนั้นพลาสติกจะถูกผลักดันให้เคลื่อนที่ไปตามแนวของร่องของสกรูไปสู่หัวตายด้วยแรงขับจากมอเตอร์ ผ่านเฟืองทด โดยในระหว่างการเคลื่อนที่นี้พลาสติกจะหลอมเหลวโดยความร้อนจากแรงเสียดทาน และเครื่องให้ความร้อน ที่ติดตั้ง ณ ผนังของกระบอก และจะกลายเป็นพลาสติกเหลวก่อนที่จะถูกอัดรีดออกมาเป็นผลิตภัณฑ์ที่หัวตาย โดยผลิตภัณฑ์พลาสติกที่ผลิตได้จากเครื่องอัดรีดพลาสติกนั้นๆ ก็จะมีลักษณะยาวต่อเนื่องและมีพื้นที่หน้าตัดคล้ายกับหัวตาย ตัวอย่างของลักษณะของพื้นที่หน้าตัดของผลิตภัณฑ์แบบต่างๆ ที่ผลิตได้จากเครื่องอัดรีด แสดงดังตาราง 2.2

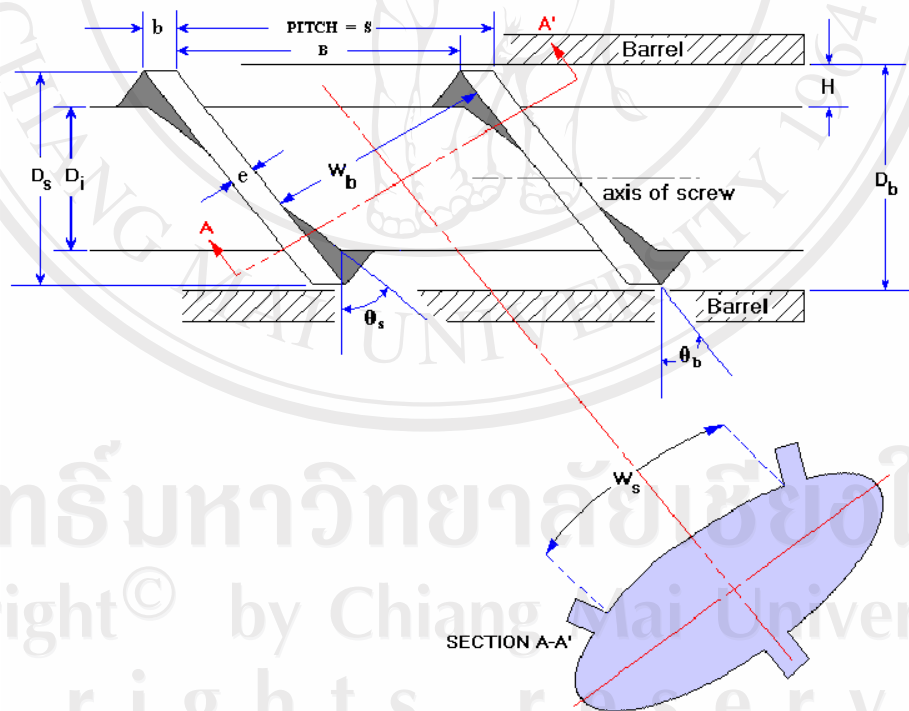
ตาราง 2.2 แสดงรูปแบบต่างๆของผลิตภัณฑ์ที่ผลิตได้จากเครื่องอัดรีด (เจริญ, 2542)

ชนิดผลิตภัณฑ์	ตัวอย่าง
ฟิล์ม (Film)	
แผ่นบาง (Sheet)	
เส้น (Solid melt strand profile)	
รูปร่างแบบเปิด (Open profile)	
รูปร่างกลวง (Hollow-chamber profile)	
ท่อ (Tube)	

นอกจากการแปรรูปพลาสติกโดยตรงแล้ว เครื่องอัดรีดยังสามารถใช้ในงานประเภทอื่นๆ เช่น การเคลือบพลาสติกลงบนวัสดุชนิดอื่นๆ การอัดรีดแบบเป่า การเป่าฟิล์ม การผสมพลาสติกกับสารเติมแต่ง (Additives) เพื่อเป็นการเตรียมวัสดุสำหรับการแปรรูปต่อไป

2.4 ส่วนประกอบของสกรูในเครื่องอัดรีดพลาสติกชนิดสกรูเดี่ยว

รูป 2.6 แสดงลักษณะของสกรูซึ่งประกอบด้วย ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของกระบอก D_b , ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของแกนสกรู D_i , ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเกลียวสกรู D_s , ระยะห่างระหว่างสันเกลียวในแนวแกนสกรู หรือ พิช (Pitch) S , ระยะของสันเกลียวในแนวแกนสกรู b , ระยะของสันเกลียวในแนวตั้งฉาก e , ความลึกของร่องสกรู H , มุมเอียงของสันเกลียวที่ฉายลงบนกระบอก θ_b , มุมเอียงของสันเกลียว ณ พื้นผิวสกรู θ_s , ระยะตั้งฉากระหว่างสันเกลียวที่ฉายลงบนกระบอก W_b , ระยะตั้งฉากระหว่างสันเกลียวที่พื้นผิวสกรู W_s



รูป 2.6 แสดงลักษณะของสกรู (Rauwendaal, 1994)

และจะสามารถหาความสัมพันธ์ระหว่างค่าของสกรูได้ตามสมการที่ (2.15) ถึง (2.21)

$$H = \frac{D_b - D_i}{2} \quad (2.15)$$

$$\theta_s = \tan^{-1} \left(\frac{s}{\pi D_s} \right) \quad (2.16)$$

$$\theta_b = \tan^{-1} \left(\frac{s}{\pi D_b} \right) \quad (2.17)$$

$$W_s = S \cos \theta_s - e \quad (2.18)$$

$$W_b = S \cos \theta_b - e \quad (2.19)$$

$$\bar{\theta} = \frac{\theta_s + \theta_b}{2} = \text{มุมเอียงของสันเกลียวเฉลี่ย} \quad (2.20)$$

$$\bar{W} = \frac{W_s + W_b}{2} = \text{ระยะตั้งฉากระหว่างสันเกลียวเฉลี่ย} \quad (2.21)$$